

Katadioptrisches Projektionsobjektiv
sowie Verfahren zur Kompensation der intrinsischen
Doppelbrechung in einem solchen

=====

- Die Erfindung betrifft ein katadioptrisches Projektionsobjektiv, insbesondere zur Verwendung in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, nach dem Oberbegriff des Anspruches 1 sowie ein Verfahren zur Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung in einem Projektionsobjektiv nach dem Oberbegriff des Anspruches 11.
- Projektionsobjektive und Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlagen der oben genannten Art sind beispielsweise in der WO 01/50 171 A1 beschrieben. Wegen der eingesetzten Betriebswellenlänge von 193 nm bzw. 157 nm wird als Material der refraktiven optischen Komponenten, insbesondere also der Linsen, Kalziumfluorid eingesetzt. Aus dem Artikel "Intrinsic birefringence in calcium fluoride and barium fluoride" von J. Burnett et al. (Physical Review B, volume 64 (2001), Seiten 241102-1 bis 241102-4) ist bekannt, daß Linsen aus Fluoridkristallen intrinsische Doppelbrechung aufweisen. Diese ist stark von der Materialorientierung der Fluoridkristall-Linse und der Strahlrichtung abhängig.

- Wenn nachfolgend von einer Kristallrichtung (100) die Rede ist, so sind hiermit die Hauptkristallrichtung $\langle 100 \rangle$ sowie die aufgrund der Symmetrieeigenschaften der kubischen Kristalle hierzu äquivalenten Kristallrichtungen gemeint. Entsprechend bezeichnet die Angabe (110)-Richtung die Kristallrichtung $\langle 110 \rangle$ sowie die hierzu äquivalenten Kristallrichtungen. Die Angabe (111) schließlich kennzeich-

net sowohl die Kristallrichtung $\langle 111 \rangle$ als auch die hiermit äquivalenten Kristallrichtungen im kubischen Kristall.

Die intrinsische Doppelbrechung in Kalziumfluorid wirkt
05 sich maximal auf einen Strahl aus, welcher eine refraktive
optische Komponente entlang einer (110)-Kristallrichtung
passiert. Bei einer Strahlausbreitung in (100)-Kristall-
richtung und in (111)-Kristallrichtung weist Kalziumfluorid
dagegen keine intrinsische Doppelbrechung auf, wie dies
10 auch von der Theorie vorhergesagt wird.

In dem Artikel "The Trouble with Calcium Fluoride" von
J. Burnett et al. (spie's Oemagazine, March 2002, Seiten
23 bis 25, [http://oemagazine.com/from the magazine/mar](http://oemagazine.com/from%20the%20magazine/mar)
15 [02/biref.html](http://oemagazine.com/from%20the%20magazine/mar)) wird die Winkelabhängigkeit der intrinsi-
schen Doppelbrechung im Fluoridkristall mit kubischer
Kristallstruktur ausführlich erläutert. Die intrinsische
Doppelbrechung eines Strahls ist danach sowohl vom Öff-
nungswinkel als auch vom Azimutwinkel eines Strahls
20 abhängig. Dabei liegen im oben genannten Artikel im einzel-
nen dargelegte Symmetrien vor, wenn die Linsenachse in
(100)-, in (111)- oder auch in (110)-Richtung zeigt. Durch
den gleichzeitigen Einsatz von mehreren Linsen mit unter-
schiedlicher kristallographischer Orientierung der Linsen-
25 achse und ggfs. durch Verdrehung dieser Linsen gegenein-
ander kann der optische Wegunterschied für zwei orthogo-
nale Polarisationszustände des durchtretenden Lichtes in
einem Projektionsobjektiv reduziert werden.

30 In der Literatur wird dabei auf einen Unterschied zwischen
einem ausschließlich mit refraktiven optischen Elementen
arbeitenden Projektionsobjektiv und einem katadioptrischen
Projektionsobjektiv bei der Kompensation der intrinsischen
Spannungsdoppelbrechung nicht abgestellt.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein katadioptrischen Projektionsobjektiv der im Oberbegriff des Anspruches 1 genannten Art so auszugestalten, daß es hinsichtlich seiner intrinsisch doppelbrechenden Eigenschaften optimiert ist.

Diese Aufgabe wird durch die im Anspruch 1 angegebene Erfindung gelöst.

Grundlage der vorliegenden Erfindung ist die Erkenntnis, daß die im katadioptrischen Teil des katadioptrischen Projektionsobjektives enthaltende polarisationssensitive reflektierende Schicht den katadioptrischen Objektivteil von dem der Bildebene benachbarten dioptrischen Teil polarisationsmäßig abkoppelt. Tatsächlich hat eine unvollkommene Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung in dem katadioptrischen Objektivteil nur Auswirkungen auf die Lichtintensität in der Bildebene, nicht jedoch auf die relative Phasenlage der beiden zu einander orthogonalen Polarisationskomponenten in der Bildebene.

Ziel bei der Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung im katadioptrischen Objektivteil ist es nicht nur, den Intensitätsverlust zu minimieren, sondern darüber hinaus den antisymmetrischen Anteil der mit dem Intensitätsverlust verbundenen Apodisierung so klein wie möglich zu halten. Die Symmetrisierung der Apodisierung minimiert den Telezentriefehler. Außerdem läßt sich eine insbesondere rotationssymmetrische Apodisierung leicht durch ein entsprechendes Graufilter korrigieren.

Anders als in dem katadioptrischen Teil des Projektionsobjektives führt eine nicht kompensierte intrinsische Doppelbrechung in dem der Bildebene benachbarten dioptrischen Objektivteil zu einem Phasenunterschied der

Polarisationskomponenten des Lichts in der Bildebene und nicht zu einem Intensitätsverlust. Der Grad der Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung in dem der Bildebene benachbarten dioptrischen Teil läßt sich daher
05 am besten als Phasenunterschied zwischen den Polarisationskomponenten beschreiben. Auch dieser sollte idealerweise Null sein.

Die beschriebene polarisationsmäßige Entkopplung des
10 katadioptrischen Objektivteiles und des der Bildebene benachbarten dioptrischen Objektivteil führt nun dazu, daß refraktive optische Elemente in dem katadioptrischen Objektivteil nicht zur Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung in dem der Bildebene benachbarten diop-
15 trischen Objektivteil herangezogen werden können. Vielmehr muß die intrinsische Doppelbrechung in beiden Objektivteilen getrennt voneinander minimiert werden. Nur dann ergibt sich sowohl ein minimaler Intensitätsverlust als auch ein minimaler Gangunterschied der beiden Pola-
20 risierungskomponenten in der Bildebene und somit eine optimale Abbildungsqualität.

Die meisten katadioptrischen Projektionsobjektive weisen neben dem der Bildebene benachbarten dioptrischen Teil
25 auch einen der Objektebene benachbarten dioptrischen Teil auf, mit dem das von dem Objekt ausgehende Licht auf die Strahlumlenkeinrichtung geführt wird. In diesem Falle gibt es erfindungsgemäß zwei Alternativen, die intrinsische Doppelbrechung zu kompensieren:

30 Bei der ersten Alternative ist auch der der Objektebene benachbarte dioptrische Teil getrennt von dem katadioptrischen Teil und von dem der Bildebene benachbarten dioptrischen Teil hinsichtlich der Doppelbrechung kom-
35 pensiert. Günstiger ist es jedoch im Blick auf eine

optimale Gestaltung der Apodisierung, wenn der der Objekzebene benachbarte dioptrische Teil und der katadioptrische Teil gemeinsam, jedoch getrennt von dem der Bildebene benachbarten dioptrischen Teil hinsichtlich
05 der intrinsischen Doppelbrechung kompensiert sind.

Der Grund hierfür ist darin zu sehen, daß eine nicht auskompensierte intrinsische Doppelbrechung auch in dem der Objekzebene benachbarten dioptrischen Teil nicht zu einem
10 Phasenunterschied sondern, ähnlich wie in dem katadioptrischen Teil des Projektionsobjektives, nur zu einer Intensitätsveränderung und Apodisierung in der Bildebene führt.

15 Bei der für das Projektionsobjektiv hauptsächlich in Betracht gezogenen Betriebswellenlänge von 157 nm kommt praktisch nur in Frage, daß die refraktiven optischen Elemente aus Fluorid, insbesondere Kalzium- oder Bariumfluorid, bestehen.

20 Die getrennte Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung im katadioptrischen Teil des Projektionsobjektives ist deshalb erschwert, weil sich in diesem Teil nur verhältnismäßig wenig refraktive optische
25 Elemente, insbesondere Linsen, befinden. Eine ausreichend gute kompensierende Wirkung wird bei denjenigen Ausgestaltung der Erfindung erzielt, die Gegenstände der Ansprüche 4 bis 10 sind. Dabei wird von der Tatsache Gebrauch gemacht, daß die im katadioptrischen Teil liegenden
30 Linsen nur mit verhältnismäßig kleinem maximalem Öffnungswinkel vom Licht durchtreten werden.

Der katadioptrische Teil kann eine weitere Linse aus doppelbrechendem Material enthalten. In diesem Falle
35 haben sich die in den Ansprüchen 11 bis 14 angegebenen

kristallographischen Orientierungen als günstig erwiesen.

Der der Objektebene benachbarte dioptrische Teil des Projektionsobjektives läßt sich im allgemeinen dadurch
05 hinsichtlich seiner intrinsischen Doppelbrechung kompensieren, daß in den dortigen optischen Elementen die (100)-Richtung parallel zur optischen Achse verläuft. Dieser Weg zur Kompensation ist deshalb gangbar, weil in diesem Bereich der maximale Öffnungswinkel der Strahlen,
10 also der maximale Winkel des Strahls bezogen auf die optische Achse des Elements, ebenfalls sehr gering ist.

Neben geometrischen Strahlumlenkeinrichtungen, bei denen die reflektierende Fläche im wesentlichen metallisch oder
15 aufgrund dielektrischer Schichtstrukturen reflektiert, werden in jüngster Zeit zunehmend Strahlumlenkeinrichtungen eingesetzt, die aus zwei Prismen aus doppelbrechendem Material, insbesondere Kalziumfluorid, bestehen, zwischen denen eine polarisationssensitive Strahlteilerschicht als
20 reflektierende Schicht angeordnet ist. Wie weiter unten näher erläutert wird, zeichnet sich eine derartige Strahlteilerschicht dadurch aus, daß eine Polarisationskomponente des auftreffenden Lichtes im wesentlichen reflektiert, während die hierzu senkrechte Polarisationskomponente im
25 wesentlichen transmittiert wird. Diese Strahlteilerschicht hat also eine stark polarisierende Wirkung mit der Folge einer besonders starken polarisationsmäßigen Entkopplung zwischen denjenigen Teilen des Projektionsobjektives, die auf gegenüberliegenden Seiten der Strahlteilerschicht liegen.
30

Die beiden Prismen dieser Strahlumlenkeinrichtung bestehen ebenfalls aus kristallinem Fluoridmaterial und sind daher ebenfalls doppelbrechend. Auch diese Doppelbrechung bedarf
35 einer Kompensation. Dies ist in dem dem katadioptrischen

Teil des Projektionsobjektiv zugewandten Prisma nicht unproblematisch, da dieses von Strahlenbündeln durchlaufen wird, deren Hauptstrahlen im allgemeinen nicht sowohl vor als auch nach der Reflexion parallel zu einer Kristall-
05 richtung orientiert werden können, in der die intrinsische Doppelbrechung niedrig oder null ist. Hier müssen also Kompromisse getroffen werden:

Ein erster derartiger Kompromiß sieht so aus, daß in
10 dem dem katadioptrischen Teil zugewandten Prisma die (100)-Richtung parallel zur optischen Achse des katadioptrischen Teils verläuft. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, daß dieses Prisma zwei Mal von einem Lichtbündel etwa parallel zur optischen Achse des kata-
15 dioptrischen Teiles durchtreten wird, während das Lichtbündel, das von dem Objekt kommt, dieses Prisma nur ein Mal durchläuft. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung ist, daß beide Prismen der Strahlumlenkeinrichtung aus einem einzigen Quader aus (100)-Material geschnitten werden
20 können, ohne daß nennenswerter Materialverlust eintritt.

Die zweite, weniger bevorzugte Möglichkeit besteht darin, daß in dem dem katadioptrischen Teil zugewandten Prisma eine (100)-Richtung mit der optischen Achse des vor der
25 Strahlteilerschicht liegenden Objektivteils denselben Winkel einschließt wie eine (ggfs. andere) (100)-Richtung mit der optischen Achse des katadioptrischen Teils.

Die Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung in dem
30 Prisma, welches dem der Bildebene benachbarten dioptrischen Teil zugewandt ist, besteht zweckmäßigerweise darin, daß die (100)-Richtung parallel zur optischen Achse des katadioptrischen Teils verläuft.

35 Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es ferner, ein

Verfahren zur Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung in einem katadioptrischen Projektionsobjektiv anzugeben.

- 05 Diese Aufgabe wird durch die im Anspruch 20 angegebene Erfindung gelöst. Die Vorteile dieses erfindungsgemäßen Verfahrens entsprechen ebenso wie diejenigen der zweckmäßigen, in den Ansprüchen 21 und 22 angegebenen Ausführungsformen den oben geschilderten Vorteilen des erfindungsgemäßen katadioptrischen Projektionsobjektivs.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnung näher erläutert; die einzige Figur zeigt den Linsenschnitt eines katadioptrischen Projektionsobjektivs, welches in einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage Verwendung findet.

Das Projektionsobjektiv ist in der Figur insgesamt mit dem Bezugszeichen 1 gekennzeichnet. Es dient dazu, ein in einer Objektebene 2 angeordnetes Muster eines Retikels in eine parallel zur Objektebene 2 liegende Bildebene 3 in reduziertem Maßstab abzubilden, beispielsweise im Verhältnis 4:1. Das Projektionsobjektiv 1 hat der Objektebene 2 benachbart einen dioptrischen Teil 4, der ausschließlich refraktive optische Elementen 8, 9 enthält, eine Strahlumlenkeinrichtung 7, einen katadioptrischen Teil 5 mit einem Konkavspiegel 6 und mehreren refraktiven optischen Elementen 13 bis 16 und einen dem katadioptrischen Objektivteil 5 folgenden, der Bildebene 3 benachbarten dioptrischen Teil 18, der ebenfalls ausschließlich refraktive optische Elemente 20 bis 34 enthält.

Der erste dioptrische Teil 4 des Projektionsobjektives 1 enthält eine Lambda/4-Platte 8, auf deren Bedeutung weiter unten eingegangen wird, sowie eine plankonvexe

Linse 9.

Die Strahlumlenkeinrichtung 7 ist als Strahlteilerwürfel ausgebildet und aus zwei im Querschnitt dreieckigen
05 Prismen 7a, 7b zusammengesetzt. Zwischen diesen befindet sich eine polarisationsselektive Strahlteilerschicht 10, die als sog. "S-P-Schicht" ausgebildet ist. Dies bedeutet idealerweise, daß die Strahlteilerschicht 10 die bezüglich der Einfallsebene des Lichtes senkrechte
10 Komponente (S-Komponente) des elektrischen Feldes zu 100 % reflektiert, während sie die zur Einfallsebene parallele Komponente (P-Komponente) des elektrischen Feldes zu 100 % transmittiert. Reale Strahlteilerschichten 10 des S-P-Types kommen diesen idealen Werten recht nahe.

15 Die Strahlteilerschicht 10 ist gegen die optische Achse 11 des ersten dioptrischen Objektivteiles 4 schräg ange- stellt, derart, daß der Umlenkwinkel etwas mehr als 90°, beispielsweise 103° bis 105° beträgt. Durch die
20 im ersten dioptrischen Objektivteil 4 enthaltene Lambda/4-Platte 8 wird dafür gesorgt, daß das von dem Objekt ausgehende Licht mit der zur Reflexion erforderlichen S-Polarisation auf die Strahlteilerschicht 10 trifft.

25 Das an der Strahlteilerschicht 10 reflektierte Licht trifft im katadioptrischen Teil 5 des Projektionsobjek- tives 1 zunächst auf eine verhältnismäßig dünne Negativ- Meniskuslinse 13 und sodann auf eine weitere Lambda/4- Platte 14. Durch die Lambda/4-Platte 14 wird das von
30 der Strahlteilerschicht 10 kommende Licht zirkular po- larisiert. Es durchtritt so zwei weitere Negativ-Menis- kuslinsen 15, 16 und wird dann an dem Konkavspiegel 6 reflektiert.

35 Das Licht durchtritt dann die diffraktiven optischen

- Elemente 16, 15, 14, 13 des katadioptrischen Teils 5 des Projektionsobjektives 1 in entgegengesetzter Richtung. Beim zweiten Durchtritt durch die Lambda/4-Platte 14 wird das zirkular polarisierte Licht wieder in Licht mit linearer Polarisation umgewandelt, das nunmehr aber mit P-Polarisation beim zweiten Durchgang auf die Strahlteilerschicht 10 trifft und deshalb von dieser transmittiert wird.
- 10 Das die Strahlteilerschicht 10 durchtretende Licht trifft auf einen ebenen Umlenkspiegel 17, der so ausgerichtet ist, daß die optische Achse 19 des zweiten dioptrischen Teiles 18 des Projektionsobjektives 1 parallel zur optischen Achse 11 des ersten dioptrischen Teiles 4 verläuft.
- 15 Dies ist gleichbedeutend mit der Aussage, daß sich die Bildebene 3 parallel zur Objektebene 2 erstreckt. Der zweite dioptrische Objektivteil 18 umfasst insgesamt fünfzehn refraktive optische Elemente, von denen dreizehn, die mit den Bezugszeichen 20 bis 32 versehen sind, Linsen sind, eines, das mit dem Bezugszeichen 33 versehen ist, eine weitere Lambda/4-Platte ist und das letzte vor der Bildebene 3 eine planparallele Abschlußplatte ist.
- Da das beschriebene Projektionsobjektiv 1 zur Verwendung mit Licht im fernen Ultraviolettbereich, insbesondere mit einer Wellenlänge von 157 nm, bestimmt ist, bestehen alle refraktiven optischen Komponenten aus Kalziumfluorid. Die hiermit verbundene intrinsische Doppelbrechung dieser refraktiven optischen Elemente bedürfen einer Kompensation.
- 30 Aufgrund der besonderen Ausgestaltung des Projektionsobjektives 1 als katadioptrisches mit der polarisationsselektiven Strahlteilerfläche 10 ergeben sich in diesem Zusammenhang Besonderheiten, auf die nachfolgend näher eingegangen wird:

Die polarisationsselektive Strahlteilerschicht 10 entkoppelt den der Objektebene 2 benachbarten dioptrischen Objektivteil 4 von dem katadioptrischen Objektivteil 5 und diesen wiederum von dem der Bildebene 3 benachbarten
05 dioptrischen Objektivteil 18.

Dies sei zunächst für den dioptrischen Objektivteil 4 erklärt: Ohne entsprechende Kompensation bewirkt die Doppelbrechung der Elemente 8, 9 vor der Reflexion an der
10 Strahlteilerschicht 10 eine Änderung des Polarisationszustandes des Lichts. Dieses ist nunmehr nicht ausschließlich S-polarisiert und wird daher nicht vollständig reflektiert. Licht, das durch intrinsische Doppelbrechung in den falschen Polarisationszustand gelangt, wird in der Strahl-
15 teilerschicht 10 absorbiert oder transmittiert. Es findet also eine Reduzierung der Intensität des in den katadioptrischen Teil 5 des Projektionsobjektives 1 eintretenden Lichtes statt. Die intrinsische Doppelbrechung im ersten dioptrischen Teil 4 beeinflusst somit in der Bildebene 3
20 die Phasenlage im wesentlichen nicht sondern verändert dort ausschließlich die Lichtintensität.

Ähnliches gilt für die Verhältnisse innerhalb des katadioptrischen Objektivteiles 5: Eine intrinsische Doppel-
25 brechung in den refraktiven optischen Elementen 13, 14, 15, 16, die nach der Reflexion an der Strahlteilerschicht 10 doppelt durchlaufen werden, führt zu einer Änderung des Polarisationszustandes des zum zweiten Mal auf die Strahlteilerschicht 10 auftreffenden Lichtes, sofern
30 hiergegen keine besonderen Maßnahmen ergriffen werden. Das Licht erhält dabei eine unerwünschte S-Polarisationskomponente, die an der Strahlteilerschicht 10 entweder reflektiert oder absorbiert statt transmittiert wird, so daß auch dieses Licht letztendlich in der Bildebene 3
35 fehlt. Dieser Effekt kann zu einer über zehnprozentigen

Intensitätsänderung führen und außerdem die Abbildungsqualität beeinträchtigen. Beispielsweise leiden die Linearität der abgebildeten Strukturen oder die Telezentrie.

- 05 Die refraktiven optischen Elemente 20 bis 34 in der Bildebene 3 benachbarten dioptrischen Objektivteil 18 bewirken aufgrund ihrer intrinsischen Doppelbrechung ebenfalls eine Änderung des Polarisationszustandes. Hier folgt jedoch, anders als in der Objektebene 2 benachbarten
10 dioptrischen Objektivteil 4 und im katadioptrischen Objektivteil 5, keine polarisationssensitive Schicht mehr. Dies führt dazu, daß die Änderung des Polarisationszustandes in der Bildebene 3 in einem Phasenunterschied der Polarisationskomponenten und nicht in einer Intensitäts-
15 veränderung resultiert.

Die geschilderte polarisationsmäßige Entkoppelung der verschiedenen Teile 4, 5 und 18 des Projektionsobjektives 1 hat nun zur Folge, daß die intrinsische Doppelbrechung in jedem dieser Teile 4, 5, 18 für sich kompensiert werden muß. Es ist also insbesondere nicht möglich, in die Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung des der Bildebene 3 benachbarten dioptrischen Teiles 18 des Projektionsobjektives 1 refraktive Elemente
20 aus dem der Objektebene 2 benachbarten dioptrischen Teil 4 und dem katadioptrischen Teil 5 einzubeziehen.

Bei der nachfolgenden Beschreibung der Art und Weise, wie in den verschiedenen Teilen des Projektionsobjektives 1 die intrinsische Doppelbrechung kompensiert wird,
30 werden verschiedene Begriffe verwendet, die nachfolgend definiert werden.

Zur Definition der Drehstellung eines optischen Elements
35 wird auf eine "Bezugsrichtung" zurückgegriffen. Diese

Bezugsrichtung steht auf der Zeichenebene der Figur senkrecht und zeigt auf den Betrachter zu.

Die Qualität der Kompensation im der Objektebene (2) benachbarten dioptrischen Teil (4) und im katadioptrischen Teil (5) wird durch einen "Intensitätsverlust" charakterisiert. Dabei handelt es sich um den maximalen Verlust der Intensität eines von der Objektebene ausgehenden Lichtbündels zwischen der Objektebene 2 und der Bildebene 3, die von den jeweils betrachteten optischen Elementen verursacht wird.

Als weitere Kenngröße für die Qualität der Kompensation im der Objektebene 2 benachbarten dioptrischen Teil 4 und im katadioptrischen Teil 5 wird ein "antisymmetrischer Anteil" der Apodisierung verwendet. Diese Kenngröße ist definiert als der maximale Wert von

$$I_{\text{anti}} = [I(x_p, y_p) - I(-x_p, -y_p)]/2,$$

wobei $I(x_p, y_p)$ die Intensität an einem Punkt in der Pupille mit den Koordinaten x_p, y_p ist.

Die intrinsische Doppelbrechung in dem der Objektebene 2 benachbarten dioptrischen Teil 4 wird im wesentlichen mit folgenden Maßnahmen kompensiert:

Da der maximale Öffnungswinkel des vom Achspunkt ausgehenden Strahlenbündels in dem ersten dioptrischen Objektivteil 4 verhältnismäßig klein ist (beim konkret dargestellten Ausführungsbeispiel nur $8,3^\circ$), können sowohl die Lambda/4-Platte 8 als auch die Linse 9 aus (100)- oder aus (111)-Material mit beliebiger Drehposition zueinander hergestellt werden.

Zur Minimierung der intrinsischen Doppelbrechung im ersten Prisma 7a der Strahlumlenkeinrichtung 7b gibt es zwei bevorzugte Möglichkeiten:

- 05 Aufgrund des von 90° abweichenden Umlenk winkels zwischen dem der Objektebene 2 benachbarten dioptrischen Teil 4 und dem katadioptrischen Teil 5 des Projektionsobjektives 1 ist es nicht möglich, eine (100)-Kristallrichtung sowohl parallel zur optischen Achse 11 des dioptrischen Teiles
10 4 als auch parallel zur optischen Achse 12 des katadioptrischen Teils 5 auszurichten.

- In einem ersten möglichen Kompromiss wird die kristallographische Orientierung des ersten Prismas 7a der Strahlumlenkeinrichtung 7 so gewählt, daß eine (100)-Kristallrichtung mit der optischen Achse (11) des dioptrischen Objektivteiles 4 denselben Winkel einschließt wie eine zweite (100)-Kristallrichtung mit der optischen Achse 12 des katadioptrischen Objektivteiles 5. In diesem Falle beträgt
15 der Intensitätsverlust für das vom Achspunkt ausgehende Strahlenbündel in der Bildebene 3 %, der nicht antisymmetrische Anteil der Apodisierung ist 0,68 %.

- Alternativ ist es möglich, die (100)-Kristallrichtung parallel zur optischen Achse 12 des katadioptrischen Objektivteiles 5 zu legen. Dabei wird berücksichtigt, daß die aus dem dioptrischen Teil 4 des Projektionsobjektives 1 kommenden Lichtstrahlen das erste Prisma 7a nur ein Mal, die den katadioptrischen Teil 5 durchlaufenden
25 Lichtstrahlen das erste Prisma 7a der Strahlumlenkeinrichtung 7 dagegen zwei Mal durchtreten. Die Veränderung der Intensität in der Bildebene 3 beträgt in diesem Falle 2,15 %. Der nicht rotationssymmetrische Anteil der Apodisierung ist 0,04 %. Diese zweite Lösung ist auch aus Materialgründen besser: Die beiden Prismen 7a und 7b können aus
30
35

einem Würfel ohne Materialverluste ausgeschnitten werden.

Beide Lösungen sind dann äquivalent, wenn der Winkel zwischen der optischen Achse 11 des der Objektebene 2 benachbarten dioptrischen Teiles 4 und der optischen Achse 12 des katadioptrischen Teiles 5 anders als beim dargestellten Ausführungsbeispiel 90° beträgt.

Die Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung innerhalb des katadioptrischen Teiles 5 des Projektionsobjektives 1 gibt es erneut verschiedene Optionen.

Da der katadioptrische Teil 5 des Projektionsobjektives 1 nur verhältnismäßig wenig refraktive Elemente, insbesondere nur drei Linsen 13, 15, 16 enthält, ist es nicht möglich, entsprechend dem eingangs genannten Stand der Technik durch Zusammenfassung mehrerer entsprechend mit ihren Achsen orientierter Linsen zu Gruppen und gegenseitige Verdrehung innerhalb der Gruppen und der Gruppen gegeneinander zu einer sehr guten Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung zu gelangen. Unter diesen erschwerten Bedingungen wird die Lösung unter Berücksichtigung des in dem jeweils betrachteten refraktiven Element vorherrschenden maximalen Öffnungswinkel gesucht.

Für die Kompensation der Meniskuslinsen 15, 16 des katadioptrischen Teils 5 gibt es verschiedene Möglichkeiten:

Beispiel 1:

Die Achsen beider Linsen (15, 16) verlaufen in (110)-Richtung. Der Drehwinkel zwischen der [1-10]-Kristallrichtung der einen Linse 15 und der Bezugsrichtung ist 0° , der Drehwinkel zwischen der [1-10]-Kristallrichtung der anderen Linse 16 und der Bezugsrichtung ist 90° . Der dabei eintre-

tende Intensitätsverlust ist 3,15%, der antisymmetrische Anteil der Apodisierung ist 0,62%.

Beispiel 2:

05

Die Achsen beider Linsen (15, 16) verlaufen in (110)-Richtung. Der Drehwinkel zwischen der [1-10]-Kristallrichtung der einen Linse 15 und der Bezugsrichtung ist 90° , der Drehwinkel zwischen der [1-10]-Kristallrichtung der anderen
10 Linse 16 und der Bezugsrichtung ist 0° . Der dabei eintretende Intensitätsverlust ist 3,02%, der antisymmetrische Anteil der Apodisierung ist 0,54%.

Beispiel 3:

15

Die Achsen beider Linsen (15, 16) verlaufen in (111)-Richtung. Der Drehwinkel zwischen der [1-10]-Kristallrichtung der einen Linse 15 und der Bezugsrichtung ist 0° , der Drehwinkel zwischen der [1-10]-Kristallrichtung der anderen
20 Linse 16 und der Bezugsrichtung ist 60° . Der dabei eintretende Intensitätsverlust ist 13,63%, der antisymmetrische Anteil der Apodisierung ist 5,95%.

Beispiel 4:

25

Die Achsen beider Linsen (15, 16) verlaufen in (111)-Richtung. Der Drehwinkel zwischen der [1-10]-Kristallrichtung der einen Linse 15 und der Bezugsrichtung ist 30° , der Drehwinkel zwischen der [1-10]-Kristallrichtung der anderen
30 Linse 16 und der Bezugsrichtung ist 90° . Der dabei eintretende Intensitätsverlust ist 8,02%, der antisymmetrische Anteil der Apodisierung ist 3,21%.

Beispiel 5:

35

Die Achsen beider Linsen (15, 16) verlaufen in (100)-Richtung. Der Drehwinkel zwischen der [010]-Kristallrichtung der einen Linse 15 und der Bezugsrichtung ist 0° , der Drehwinkel zwischen der [010]-Kristallrichtung der anderen
05 Linse 16 und der Bezugsrichtung ist 45° . Der dabei eintretende Intensitätsverlust ist 11,36%, der antisymmetrische Anteil der Apodisierung ist 4,29%.

Beispiel 6:

10

Die Achsen beider Linsen (15, 16) verlaufen in (100)-Richtung. Der Drehwinkel zwischen der [010]-Kristallrichtung der einen Linse 15 und der Bezugsrichtung ist 45° , der Drehwinkel zwischen der [010]-Kristallrichtung der anderen
15 Linse 16 und der Bezugsrichtung ist 90° . Der dabei eintretende Intensitätsverlust ist 15,96%, der antisymmetrische Anteil der Apodisierung ist 6,52%.

In der ersten Meniskuslinse 13 des katadioptrischen Teils
20 5 ist der maximale Strahlöffnungswinkel 14° . Erneut gibt es verschiedene Möglichkeiten, im Zusammenspiel mit den obigen Beispielen 1 bis 6 die störende Wirkung der durch diese Linse 13 bewirkten intrinsischen Doppelbrechung zu reduzieren:

25

Beispiel 6:

Die Achse der Linse 13 liegt in der (100)-Kristallrichtung. Der Winkel, den die [010]-Kristallrichtung mit der Bezugsrichtung einschließt, beträgt 0° . Bei der in dem obigen
30 Beispiel 2 genannten Orientierung der Meniskuslinsen 15, 16 ergeben sich insgesamt ein Intensitätsverlust von 2,43% sowie ein antisymmetrischer Anteil der Apodisierung von 0,60%. Bei der in dem obigen Beispiel 4 genannten
35 Orientierung der Meniskuslinsen 15, 16 ergeben sich

insgesamt ein Intensitätsverlust von 6,35% und ein antisymmetrischer Anteil der Apodisierung von 2,48%.

Beispiel 7:

05

Die Achse der Linse 13 liegt in der (100)-Kristallrichtung. Der Winkel, den die [010]-Kristallrichtung mit der Bezugsrichtung einschließt, beträgt 45°. Bei der in dem obigen Beispiel 2 genannten Orientierung der Meniskuslinsen 15, 16 ergeben sich insgesamt ein Intensitätsverlust von 2,30% sowie ein antisymmetrischer Anteil der Apodisierung von 0,60%. Bei der in dem obigen Beispiel 4 genannten Orientierung der Meniskuslinsen 15, 16 ergeben sich insgesamt ein Intensitätsverlust von 5,92% und ein antisymmetrischer Anteil der Apodisierung von 2,21%.

15

Beispiel 8:

Die Achse der Linse 13 liegt in der (111)-Kristallrichtung. Der Winkel, den die [1-10]-Kristallrichtung mit der Bezugsrichtung einschließt, beträgt 30°. Bei der in dem obigen Beispiel 2 genannten Orientierung der Meniskuslinsen 15, 16 ergeben sich insgesamt ein Intensitätsverlust von 3,63% sowie ein antisymmetrischer Anteil der Apodisierung von 1,20%. Bei der in dem obigen Beispiel 4 genannten Orientierung der Meniskuslinsen 15, 16 ergeben sich insgesamt ein Intensitätsverlust von 3,99% und ein antisymmetrischer Anteil der Apodisierung von 0,87%.

25

30 Beispiel 9:

Die Achse der Linse 13 liegt in der (111)-Kristallrichtung. Der Winkel, den die [1-10]-Kristallrichtung mit der Bezugsrichtung einschließt, beträgt 90°. Bei der in dem obigen Beispiel 2 genannten Orientierung der Meniskuslinsen 15,

35

16 ergeben sich insgesamt ein Intensitätsverlust von 4,83% sowie ein antisymmetrischer Anteil der Apodisierung von 1,99%. Bei der in dem obigen Beispiel 4 genannten Orientierung der Meniskuslinsen 15, 16 ergeben sich
05 insgesamt ein Intensitätsverlust von 12,65% und ein antisymmetrischer Anteil der Apodisierung von 5,04%.

Die Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung innerhalb des zweiten Prismas 7b der Strahlumlenkeinrichtung
10 7 geschieht dadurch, daß die kristallographische (100)-Richtung parallel zur optischen Achse 12 des katadioptrischen Objektivteiles 5 gelegt wird.

Die Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung innerhalb des der Bildebene 3 benachbarten dioptrischen Objektivteiles 18 schließlich kann, da dort ausreichend refraktive optische Elemente zur Verfügung stehen, nach einem der im Stande der Technik ausführlich beschriebenen Verfahren stattfinden, beispielsweise durch den gleichzeitigen Einsatz von Kalzium- und Bariumfluorid oder durch
20 den gleichzeitigen Einsatz von gegeneinander verdrehten Linsen aus Fluoridkristall, deren Linsenachse in die (100)- oder in die (111)-Kristallrichtung weisen. Hierauf wird hier nicht näher eingegangen.

Patentansprüche

=====

05

1. Katadioptrisches Projektionsobjektiv, insbesondere zur Verwendung in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, zum Abbilden eines in einer Objektebene angeordneten Objekts in eine Bildebene mit

10

a) einem katadioptrischen Teil, der eine Mehrzahl refraktiver, zwei Mal von den Lichtstrahlen durchlaufener optischer Elemente und einen abbildenden Spiegel umfasst;

15

b) einen der Bildebene benachbarten dioptrischen Teil, der eine Mehrzahl ausschließlich refraktiver optischer Elemente umfasst;

20

c) einer Strahlumlenkeinrichtung, welche die von einem in der Objektebene befindlichen Objektpunkt ausgehenden Lichtstrahlen in den katadioptrischen Teil einleitet und eine polarisationssensitive reflektierende Schicht aufweist,

25

dadurch gekennzeichnet, daß

30

d) mindestens ein Teil der refraktiven optischen Elemente in dem katadioptrischen Teil (5) und in dem der Bildebene (3) benachbarten dioptrischen Teil (18) aus einem Material besteht, das intrinsische Doppelbrechung aufweist,

35

e) durch Wahl der kristallographischen Orientierung des Materials und/oder des Materials und/oder Kompen-

sationsbeschichtungen für mindestens einen Teil der doppelbrechenden refraktiven optischen Elemente der störende Teil der intrinsischen Doppelbrechung zumindest teilweise reduziert ist,

05

wobei

- f) der katadioptrische Teil (5) und der dioptrische Teil (18) getrennt voneinander hinsichtlich der intrinsischen Doppelbrechung kompensiert sind.
- 10

2. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, welches einen der Objektebene benachbarten dioptrischen Teil enthält, dadurch gekennzeichnet, daß der der Objektebene (2) benachbarte dioptrische Teil (4) getrennt von dem katadioptrischen Teil (5) und von dem der Bildebene (3) benachbarten dioptrischen Teil (18) hinsichtlich der intrinsischen Doppelbrechung kompensiert ist.

15

20

3. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, welches einen der Objektebene benachbarten dioptrischen Teil enthält, dadurch gekennzeichnet, daß der der Objektebene (2) benachbarte dioptrische Teil (4) und der katadioptrische Teil (5) gemeinsam, jedoch getrennt von dem der Bildebene (3) benachbarten dioptrischen Teil (18) hinsichtlich der intrinsischen Doppelbrechung kompensiert sind.

25

4. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die doppelbrechenden refraktiven optischen Elemente aus Fluorid, insbesondere Kalzium- oder Bariumfluorid, bestehen.

30

35

5. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch
4, dadurch gekennzeichnet, daß der katadioptrische
Teil (5) zwei Linsen (15, 16) enthält, deren Achsen
parallel zur (110)-Richtung verlaufen, wobei die [1-10]-
05 Richtung der ersten Linse (15) einen Winkel von 0° und
die [1-10]-Richtung der zweiten Linse (16) einen Winkel
von 90° mit einer Bezugsrichtung einschließt, die auf
der Zeichenebene der Figur senkrecht steht und auf den
Betrachter zeigt.
- 10
6. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch
4, dadurch gekennzeichnet, daß der katadioptrische
Teil (5) zwei Linsen (15, 16) enthält, deren Achsen
parallel zur (110)-Richtung verlaufen, wobei die [1-10]-
15 Richtung der ersten Linse (15) einen Winkel von 90° und
die [1-10]-Richtung der zweiten Linse (16) einen Winkel
von 0° mit einer Bezugsrichtung einschließt, die auf
der Zeichenebene der Figur senkrecht steht und auf den
Betrachter zeigt.
- 20
7. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch
4, dadurch gekennzeichnet, daß der katadioptrische
Teil (5) zwei Linsen (15, 16) enthält, deren Achsen
parallel zur (111)-Richtung verlaufen, wobei die [1-10]-
25 Richtung der ersten Linse (15) einen Winkel von 0° und
die [1-10]-Richtung der zweiten Linse (16) einen Winkel
von 60° mit einer Bezugsrichtung einschließt, die auf
der Zeichenebene der Figur senkrecht steht und auf den
Betrachter zeigt.
- 30
8. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch
4, dadurch gekennzeichnet, daß der katadioptrische
Teil (5) zwei Linsen (15, 16) enthält, deren Achsen
parallel zur (111)-Richtung verlaufen, wobei die [1-10]-
35 Richtung der ersten Linse (15) einen Winkel von 30° und

die [1-10]-Richtung der zweiten Linse (16) einen Winkel von 90° mit einer Bezugsrichtung einschließt, die auf der Zeichenebene der Figur senkrecht steht und auf den Betrachter zeigt.

05

9. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der katadioptrische Teil (5) zwei Linsen (15, 16) enthält, deren Achsen parallel zur (100)-Richtung verlaufen, wobei die [010]-
10 Richtung der ersten Linse (15) einen Winkel von 0° und die [010]-Richtung der zweiten Linse (16) einen Winkel von 45° mit einer Bezugsrichtung einschließt, die auf der Zeichenebene der Figur senkrecht steht und auf den Betrachter zeigt.

15

10. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der katadioptrische Teil (5) zwei Linsen (15, 16) enthält, deren Achsen parallel zur (100)-Richtung verlaufen, wobei die [010]-
20 Richtung der ersten Linse (15) einen Winkel von 45° und die [010]-Richtung der zweiten Linse (16) einen Winkel von 90° mit einer Bezugsrichtung einschließt, die auf der Zeichenebene der Figur senkrecht steht und auf den Betrachter zeigt.

25

11. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der katadioptrische Teil (5) eine weitere Linse (13) enthält, deren Achse parallel zur (100)-Richtung verläuft, wobei
30 die [010]-Richtung der weiteren Linse (13) einen Winkel von 0° mit einer Bezugsrichtung einschließt, die auf der Zeichenebene der Figur senkrecht steht und auf den Betrachter zeigt.

35 12. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach einem der

05 Ansprüche 4 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der katadioptrische Teil (5) eine weitere Linse (13) enthält, deren Achse parallel zur (100)-Richtung verläuft, wobei die [010]-Richtung der weiteren Linse (13) einen Winkel von 45° mit einer Bezugsrichtung einschließt, die auf der Zeichenebene der Figur senkrecht steht und auf den Betrachter zeigt.

10 13. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der katadioptrische Teil (5) eine weitere Linse (13) enthält, deren Achse parallel zur (111)-Richtung verläuft, wobei die [1-10]-Richtung der weiteren Linse (13) einen Winkel von 30° mit einer Bezugsrichtung einschließt, die auf der
15 Zeichenebene der Figur senkrecht steht und auf den Betrachter zeigt.

14. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach einem der Ansprüche 4 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß der
20 katadioptrische Teil (5) eine weitere Linse (13) enthält, deren Achse parallel zur (111)-Richtung verläuft, wobei die [1-10]-Richtung der weiteren Linse (13) einen Winkel von 90° mit einer Bezugsrichtung einschließt, die auf der Zeichenebene der Figur senkrecht steht und auf den Betrachter
25 zeigt.

15. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß in den refraktiven optischen Elementen (8, 9) des der
30 Objektebene (2) benachbarten dioptrischen Teil (4) die (100)-Richtung parallel zur optischen Achse (11) verläuft.

16. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,
35 daß die Strahlumlenkeinrichtung (7) aus zwei Prismen (7a,

7b) aus doppelbrechendem Material, insbesondere Fluorid, besteht, zwischen denen eine polarisationssensitive Strahlteilerschicht (10) als reflektierende Schicht angeordnet ist.

05

17. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch

16, dadurch gekennzeichnet, daß in dem dem katadioptrischen Teil (5) zugewandten Prisma (7a) die (100)-Richtung parallel zur optischen Achse (12) des katadioptrischen

10 Teils (5) verläuft.

18. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach Anspruch

16, dadurch gekennzeichnet, daß in dem dem katadioptrischen Teil (5) zugewandten Prisma (7a) eine (100)-

15 Richtung mit der optischen Achse (11) des der Objektebene (2) benachbarten Objektivteils (4) denselben Winkel einschließt wie eine (100)-Richtung mit der optischen Achse (12) des katadioptrischen Teils (5).

20 19. Katadioptrisches Projektionsobjektiv nach einem

der Ansprüche 16 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß in dem Prisma (7b), welches dem der Bildebene (3) benachbarten dioptrischen Teil (18) zugewandt ist, die (100)-Richtung parallel zur optischen Achse des katadioptrischen

25 Teils (5) verläuft.

20. Verfahren zur Kompensation der intrinsischen Doppelbrechung in einem Projektionsobjektiv, insbesondere

für eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage, welches aufweist:

30

a) einen katadioptrischen Teil, der eine Mehrzahl refraktiver, zwei Mal von der Lichtquelle durchlaufener optischer Elemente sowie einen abbildenden Spiegel

35

umfasst;

b) einen der Bildebene benachbarten dioptrischen Teil, der eine Mehrzahl ausschließlich refraktiver optischer Elemente umfasst;

05

c) einer Strahlumlenkeinrichtung, welche die von einem in der Objektebene befindlichen Objektpunkt ausgehenden Lichtstrahlen in den katadioptrischen Teil einleitet und eine polarisationssensitive reflektierende Schicht aufweist,

10

dadurch gekennzeichnet, daß

d) der störende Einfluß der intrinsische Doppelbrechung durch Wahl der kristallographischen Orientierung des Materials und/oder des Materials und/oder Kompensationsbeschichtungen in mindestens einem Teil der doppelbrechenden refraktiven Elemente in dem der Bildebene (3) benachbarten dioptrischen Teil (18) getrennt von dem katadioptrischen Teil (5) reduziert wird.

15

20

21. Verfahren nach Anspruch 20, bei welchem das Projektionsobjektiv zusätzlich einen der Objektebene benachbarten dioptrischen Teil aufweist, dadurch gekennzeichnet, daß der der Objektebene (2) benachbarte dioptrische Teil (4) getrennt von dem katadioptrischen Teil (5) und von dem der Bildebene (3) benachbarten dioptrischen Teil (18) hinsichtlich der intrinsischen Doppelbrechung kompensiert wird.

25

30

22. Verfahren nach Anspruch 20, bei welchem das Projektionsobjektiv zusätzlich einen der Objektebene benachbarten dioptrischen Teil aufweist, dadurch gekennzeichnet, daß der der Objektebene (2) benachbarte diop-

35

trische Teil (4) und der katadioptrische Teil (5) gemeinsam, jedoch getrennt von dem der Bildebene (3) benachbarten dioptrischen Teil (18) hinsichtlich der intrinsischen Doppelbrechung kompensiert wird.

Zusammenfassung

=====

05

Ein katadioptrisches Projektionsobjektiv (1), das insbesondere zur Verwendung in einer mikrolithographischen Projektionsbelichtsanlage bestimmt ist, umfasst sowohl in einem katadioptrischen Teil (5) als auch in einem
10 der Bildebene (3) benachbarten dioptrischen Teil (18) eine Mehrzahl refraktiver, intrinsische Doppelbrechung aufweisender optischer Elemente. Da diese refraktiven optischen Elemente in dem katadioptrischen Teil (5) und dem dioptrischen Teil (18) durch eine polarisations-
15 sensitive reflektierende Schicht (10) voneinander polarisationsmäßig entkoppelt sind, sind der katadioptrische Teil (5) und der dioptrische Teil (18) getrennt voneinander hinsichtlich der intrinsischen Doppelbrechung kompensiert.

20

